

# Aspectos del desarrollo de heteroestructuras semiconductoras usadas en electrónica de alta frecuencia y optoelectrónica

Hugo L. Aya Baquero

## RESUMEN

La mayor parte de nuestra comprensión del transporte de electrones en los sólidos está basada en una concepción semiclásica, según la cual los electrones obedecen a las leyes de Newton. Los efectos cuánticos como la cuantización de los niveles de energía, el efecto túnel y las transiciones ópticas, no pueden ser explicados dentro de este marco conceptual. Los efectos cuánticos están presentes en dispositivos de dimensiones menores a 100 nanómetros.

Con el desarrollo de nuevas técnicas de preparación de películas ultradelgadas es posible la obtención de variaciones abruptas de potenciales, como barreras y pozos de potencial en la dirección perpendicular al plano de la capa. Si el grosor del pozo de potencial es comparable con la longitud de onda del electrón, se forman una serie de estados energéticos cuantizados dentro del pozo. El control y modulación de las diferentes transiciones electrónicas entre estos estados da origen a todo tipo de dispositivos optoelectrónicos.

Palabras clave: Heteroestructura, láser de heteroestructura, pozo cuántico, superredes, transiciones ópticas.

## ABSTRACT

Much of our understanding of electron transport in solids is based on the semiclassical picture that views electrons as particles obeying Newtonian mechanics. Quantum effects such as energy quantization, tunneling and optical transitions in solids cannot be understood within this conceptual framework. Quantum effects are present in devices with dimensions smaller than 100 nanometers.

With advances in preparation techniques of ultrathin heterolayers is posible create abrupt

potential variations like quantum barriers and wells, along the direction perpendicular to the layer plane. If the characteristic width of wells is comparable to the wavelength of the electrons, a series of quantum states will be formed in the wells. The control and modulation of transitions between these electronic states allow the creation of all kinds of optoelectronic devices

Key words: Heterostructure, heterostructure laser, quantum well, superlattices, optical transitions.

## INTRODUCCION

La Academia Ciencias de Suecia ha distinguido por su trabajo básico en la tecnología de comunicaciones y de la información con la mitad del premio Nobel de Física del presente año, conjuntamente, a los físicos Zhores I. Alferov del Instituto Físico-Técnico A. F. Ioffe de San Petesburgo, y a Herbert Kroemer de la Universidad de California en Santa Barbara por el desarrollo de heteroestructuras semiconductoras usadas en la electrónica de alta frecuencia y la optoelectrónica (la otra mitad del premio fue otorgada a Jack S. Kilby de la corporación Texas Instruments, por su contribución en la invención del circuito integrado).

La tecnología de la información y las comunicaciones se ha convertido en una de las más importantes en el desarrollo de la humanidad de las últimas décadas. Su importancia se puede comparar con la invención de la imprenta. Sin embargo, el impacto de las nuevas tecnologías sobre la sociedad ha sido más rápido que el de esta, puesto que ya no en siglos, sino en unos cuantos años se puede apreciar su tremenda penetración en todas las actividades humanas. Solamente en una década las

Con el desarrollo de nuevas técnicas de preparación de películas ultradelgadas es posible la obtención de variaciones abruptas de potenciales

computadoras personales se han vuelto comunes en todos los ambientes como hogares, fábricas, oficinas, colegios, universidades, etc.

Debido a la gran demanda de materiales semiconductores, cada día son mayores los requerimientos técnicos en la fabricación de dispositivos de alta tecnología. Por ejemplo, la pureza tiene que ser del orden de ppb (partes por billón), y el número de defectos de la estructura cristalina debe ser extremadamente bajo. Las capas individuales, dentro de un compuesto multicapas, tienen que acoplarse perfectamente a la estructura cristalina para minimizar las tensiones, y las transiciones estructurales entre capas tienen que ser abruptas.

Una heteroestructura semiconductor consiste en dos o más capas con diferente ancho de banda prohibida, también llamado "gap". Los semiconductores de una heteroestructura son generalmente compuestos como el Arseniuro de Galio (GaAs) de los grupos III y V de la tabla periódica o semiconductores como el Germanio (Ge) ó el Silicio (Si), dependiendo de cada aplicación estos materiales son dopados con impurezas que reemplazan algunos átomos de la estructura cristalina (In ó Al en reemplazo de Ga; P, Sb ó N en reemplazo de As). La formación de fronteras abruptas entre diferentes capas semiconductoras se realiza por diferentes métodos, como el método de Crecimiento Epitaxial de Haz Molecular (MBE Molecular Beam Epitaxy), desarrollado por A. Y. Cho, J. R. Arthur et al. [1]; y el método de Crecimiento por Deposición de Vapor Químico Metal-Orgánico (MOCVD Metallo Organic Vapor Deposition), desarrollado por H. Manasevit. En estos métodos, las capas atómicas se van creciendo una por una (crecimiento epitaxial), hasta conformar una capa semiconductor con un número de capas atómicas controlado.

## CONFINAMIENTO DE ELECTRONES

El confinamiento de una onda entre dos fronteras da origen a ondas estacionarias cuya frecuencia solamente puede tomar ciertos valores permitidos, asociados a ciertas longitudes de onda. El electrón bajo la acción de la fuerza de Coulomb del núcleo del átomo de hidrogeno solamente puede ocupar ciertos niveles de energía discretos, este fenómeno se debe a que el electrón está confinado dentro de un pozo de potencial en

su interacción con el núcleo atómico. La solución a este problema es ampliamente conocido y sabemos que esto es lo que origina la cuantización de los niveles de energía del electrón en el átomo de hidrogeno. Los espectros de emisión electromagnética del átomo de hidrógeno son el resultado de las transiciones electrónicas entre diferentes niveles energéticos.

El físico Leo Esaki [2] fue uno de los primeros científicos en proponer la fabricación de heteroestructuras semiconductoras en las cuales se pudieran confinar los portadores de carga del semiconductor (electrones y huecos). Desde ese momento se abrió un amplio campo de trabajo teórico y experimental, gracias a los avances tecnológicos logrados en el crecimiento de este tipo de estructuras. Los primeros resultados se dieron en el confinamiento de electrones en dos dimensiones (pozo cuántico), seguido por el confinamiento de electrones en una y cero dimensiones (hilos y puntos cuánticos).

## SUPERREDES Y POZOS CUANTICOS

Por supuesto, la mecánica cuántica desde sus inicios en los comienzos del siglo XX había propuesto el confinamiento de electrones en pozos de potencial de paredes rectangulares, pero sin tener como corroborarlo experimentalmente. La tecnología reciente ha permitido crear estructuras semiconductoras compuestas por tres capas de diferente ancho de zona prohibida o "gap" energético, de las cuales la capa central tiene el menor "gap" energético. Esta estructura es un pozo cuántico dentro del cual electrones y huecos del semiconductor estarán confinados.

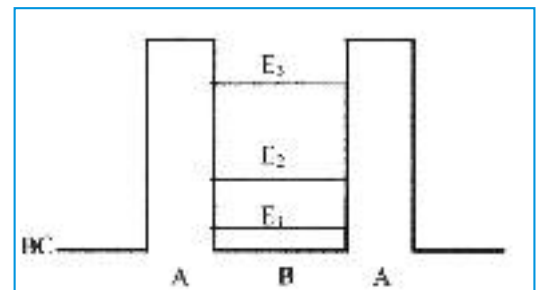


Fig. 1. Niveles energéticos dentro del pozo de potencial debido a la posición diferente de los bordes de la banda de conducción.

Las bandas de conducción y de valencia de los semiconductores están separadas por una zona de energía prohibida o "gap". Estas bandas están conformadas por niveles continuos de energía y ocupadas por electrones y huecos,

Desde ese momento se abrió un amplio campo de trabajo teórico y experimental, gracias a los avances tecnológicos logrados en el crecimiento de este tipo de estructuras.

respectivamente, generados térmicamente. La Fig. 1. muestra un pozo cuántico. El confinamiento del electrón en pozos cuánticos con ancho del orden de longitud onda del electrón (longitud de Broglie) produce un espectro discreto (1) con un número finito de niveles energéticos.

Donde  $k = 2\pi/l$  y  $m^*$  es la masa efectiva de los electrones dentro del sólido

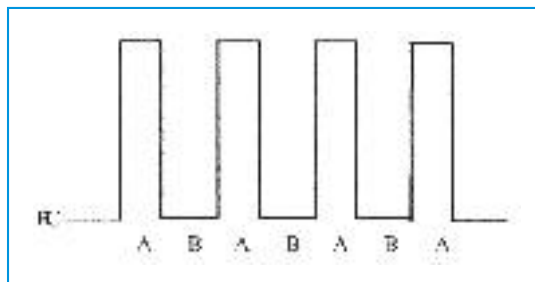


Fig. 2. Perfil de la banda de conducción de una Superred

Una superred consiste en una secuencia de capas de dos materiales semiconductores diferentes materiales A y B (Fig. 2). El potencial periódico de la superred se origina por las posiciones diferentes de los bordes de las bandas de conducción y de valencia en los dos componentes.

Como consecuencia del confinamiento de los electrones en una heteroestructura semiconductor, aparece el efecto de tunelamiento resonante de los electrones. La Fig. 3. muestra la característica de corriente contra voltaje de un diodo de doble barrera con pozo de potencial. La corriente del diodo tiene picos, debidos al efecto de resonancia de los niveles discretos del pozo con las corrientes de tunelamiento que atraviesan las barreras de potencial [3]. Este efecto ha sido usado en microondas y en circuitos lógicos.

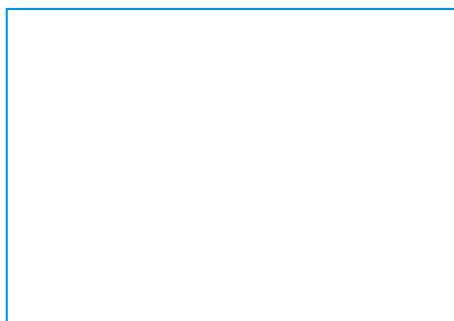


Fig. 3. Característica de corriente contra voltaje de un diodo de doble barrera con pozo de potencial [3].

## TRANSISTORES DE HETEROUNION.

La amplificación de la corriente en un BJT común se define por la razón entre la corriente de electrones a la corriente de huecos. Los electrones pasan rápidamente a través de la base desde el emisor hacia el colector sin recombinarse. Al mismo tiempo los huecos que son inyectados al emisor desde la base, limitan la amplificación de la corriente. Disminuyendo el nivel de dopaje de la base mejora la amplificación de la corriente pero también aumenta la resistencia de la base y la capacitancia entre emisor y base. Con el aumento de la constante de tiempo RC se limita severamente la respuesta del transistor a altas frecuencias.

El transistor bipolar de heterounión (heterojunction bipolar transistor - HBT) se diferencia del transistor corriente en el hecho de que la base del HBT es una capa con un ancho de zona prohibida menor. Esto conlleva la disminución de la barrera de potencial que deben superar los electrones y por lo tanto el aumento de la corriente de electrones. Entonces, si la corriente de huecos permanece inalterada, se puede aumentar la amplificación de la corriente total. También se puede reducir la amplificación de la corriente dopando fuertemente la base y disminuyendo su grosor considerablemente para disminuir la resistencia de la base y la constante de tiempo RC hasta obtener un transistor para aplicaciones de alta frecuencia.

El incremento de la eficiencia del emisor usando un mayor "gap" energético que el de la base, fue mencionado por W. B. Shockley [4-7] en su patente del transistor en 1948 y fue discutido teóricamente por I. Gubanov en 1951. Sin embargo, el análisis y sugerencias principales fueron dados por Herbert Kroemer en 1957, para entonces en la RCA. Este último sugirió, por ejemplo, un ancho de banda prohibida gradual en la base, en lugar de uno abrupto.

Los electrones de una de las capas de la heterounión penetran en la segunda capa para formar un gas de electrones bidimensional (two-dimensional electron gas 2DEG). La movilidad de los electrones dentro del 2DEG es altísima. La densidad de carga y la corriente en el 2DEG son controladas con el potencial aplicado a la compuerta. Este dispositivo es conocido como transistor de alta movilidad electrónica, también llamado transistor de efecto de campo modulado

por dopaje (High Electron Mobility Transistor HEMT ó Modulation Doped Field Effect Transistor MODFET) [8-11]. La frecuencia máxima en los que se ha reportado la operación de este tipo de transistores llega hasta los 600 GHz, cuando la ganancia desaparece. El ruido de operación de estos dispositivos es muy bajo. Este tipo de transistores fue desarrollado simultáneamente por varios grupos: en Bell Labs por R. Dingle et al. [12,13], en Japón por T. Mimura et al., y en Francia por Delagebeaudeuf et al.; y se usa en aplicaciones de microondas, comunicaciones inalámbricas militares y civiles, comunicaciones espaciales, y radioastronomía.

*Fig. 4. Fotografía del transistor HEMT*

En la fig. 4. se puede apreciar la fotografía del transistor de alta movilidad electrónica HEMT obtenida con un microscopio electrónico de barrido. Se muestra la compuerta en forma de hongo hecha con el método de litografía de haz electrónico. La heteroestructura y el gas bidimensional de electrones se encuentran bajo la compuerta. El transistor tiene temperatura de ruido equivalente récord de 3 K operando de 4 a 8 GHz

## LASERES DE HETEROESTRUCTURAS

El comienzo de las comunicaciones ópticas dependió del desarrollo de dos componentes esenciales: la fibra óptica y el láser semiconductor. El concepto de láser fue inventado en 1958 por Schawlow y Townes [14], y fue por primera vez realizado con una barra de rubí por Maiman [15] en 1960. Tras estos primeros inventos originales, fue inventada una amplia variedad de láseres: láser de He-Ne, láser de CO<sub>2</sub>, el láser "dye", y, el más importante desde el punto de vista de las comunicaciones, el láser semiconductor. Este último fue inventado simultáneamente en tres diferentes laboratorios industriales: IBM [16],

General Electric [17,18], y en el MIT Lincoln Laboratory [19].

A su vez, para que el láser semiconductor adquiriera importancia comercial, fue esencial que la temperatura de operación se pudiera incrementar, y las corrientes de operación se lograran disminuir significativamente en comparación con los reportes iniciales. El concepto de electrones y huecos confinados en el centro de una guía de onda óptica en un dispositivo de doble heterojuntura fue publicado por Kroemer [20] y luego por Alferov y Kasarinov [21,22] en 1963, y realizado por primera vez por Hayashi et al. [23] en 1970.

El chip del láser tiene un tamaño del orden de una cabeza de alfiler y por consiguiente, ocupa muy poco espacio dentro del sistema. Los más tempranos láseres semiconductores fueron fabricados de Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As crecidos en un sustrato de GaAs usando una técnica de crecimiento epitaxial de fase líquida (LPE Liquid Phase Epitaxy). En esta técnica, el líquido fundido del metal de Ga, que contiene una pequeña cantidad disuelta de Al, GaAs, y elementos de dopaje tipo p y n, como Si, Ge, Te, y Sn, era usado para crecer capas muy delgadas de semiconductores hasta obtener el deseado láser de doble heteroestructura.

Los materiales de Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As solamente emiten luz en el rango de "onda corta" de 600 a 900 nm, dentro del rango de interés de los primeros sistemas de comunicaciones ópticos. Comenzando a finales de los años 70, se demostró la viabilidad de fibras ópticas de Si en longitudes de onda de 1300 a 1550 nm. Estas fibras requerían diferentes tipos de láseres semiconductores.

El conjunto de materiales más atractivo para este rango de "onda larga", el cual domina la actual industria de telecomunicaciones de larga distancia, es el In<sub>1-x</sub>Ga<sub>x</sub>As<sub>y</sub>P<sub>1-y</sub> acoplado sobre sustratos de InP [24,25].

Dentro de los últimos desarrollos alcanzados hasta hoy, se ha reportado el láser de emisión azul (fig.5.), en el cual la región activa es una estructura multicapa de múltiples pozos cuánticos (multiple quantum wells - MQW) basada en InGaN. Superredes de AlGaIn/GaN (modulation-doped-strained-layer-superlattices - MD-SLSs) son usadas en lugar de capas de AlGaIn para confinar los fotones. El grosor de la mayoría de las 743 capas es cuidadosamente controlado.

Se puede apreciar la fotografía del transistor de alta movilidad electrónica HEMT obtenida con un microscopio electrónico de barrido.



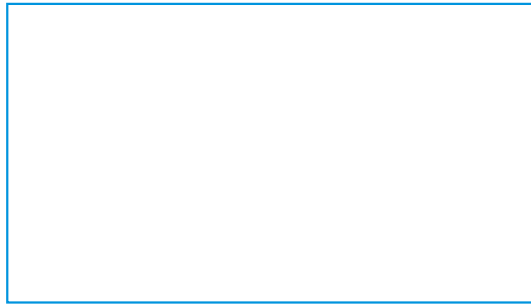


Fig. 5. Ilustración de un laser de emisión azul.

## TRANSICIONES OPTICAS DENTRO DE LAS HETEROESTRUCTURAS

Una transición interbanda es aquella en la cual un electrón es excitado desde una subbanda de la banda de valencia a una subbanda de la banda de conducción, o viceversa. Este proceso va acompañado de la absorción (emisión) de un fotón con frecuencia proporcional a la diferencia energética entre las subbandas (Fig. 6).

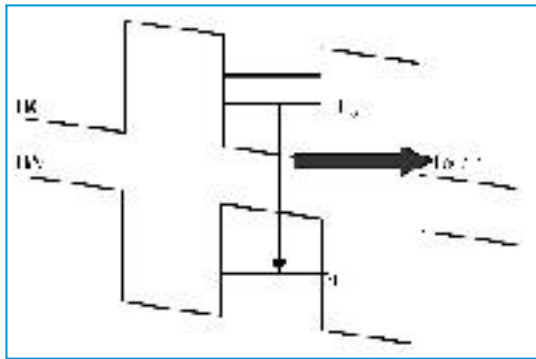


Fig. 6. Transición interbanda. La absorción va acompañada con la emisión de un fotón con frecuencia proporcional a  $DE$ .

Las transiciones intersubbandas ocurren al interior de la banda de conducción, bien sea entre los niveles discretos del pozo cuántico o entre uno de los niveles del pozo y el espectro continuo por fuera del pozo. Estas transiciones van acompañadas de procesos de emisión o absorción de fotones (Fig. 7.). Las posiciones de los niveles discretos de energía dependen del ancho del pozo, el cual se puede modular en la fabricación del dispositivo. Una de las aplicaciones del proceso de absorción de luz que genera transiciones entre una subbanda y el espectro continuo de la misma banda se da en los fotodetectores de visión infrarroja [26].

Los sistemas de comunicación submarina requieren una confiabilidad de los láseres 10 veces mayor que los sistemas terrestres.

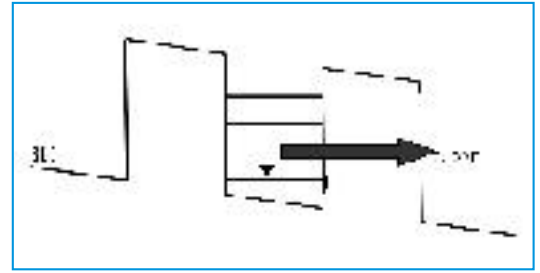


Fig. 7. Transiciones intersubbanda. La frecuencia del fotón emitido (absorbido) es proporcional a la diferencia de los niveles de las subbandas.

## CONCLUSIONES

Los éxitos obtenidos en las primeras investigaciones fueron seguidos por una enorme cantidad de trabajos en el mejoramiento del crecimiento de materiales semiconductores de los grupos III-V de la tabla periódica, definiendo las estructuras óptimas de cada dispositivo, comprendiendo el efecto de los posibles defectos y fallas y controlando las variadas propiedades esenciales que se usan en los sistemas de comunicaciones modernos.

Como resultado de toda esta actividad se resume en el hecho de que los láseres modernos se caracterizan por que son:

- Producidos con una precisión del orden de longitudes de onda.
- Modulados a una tasa de datos de 10 Gb/s sin corrimiento de frecuencia
- Diseñados para soportar variaciones de temperatura de 40 a 85 °C.
- Producidos con altos estándares de calidad a un costo por unidad de menos de 10 dólares.

Un sistema de comunicaciones moderno típico está diseñado para operar sin interrupciones debidas a fallas de los componentes, lo cual se realiza con ayuda de la redundancia en los niveles del sistema. Sin embargo, esto también requiere de cierto nivel de confiabilidad de los componentes; típicamente, no más del 1% de los láseres en campo pueden fallar por año en una vida útil de 20 a 25 años.

Los sistemas de comunicación submarina requieren una confiabilidad de los láseres 10 veces mayor que los sistemas terrestres. La confiabilidad en este nivel sólo se puede alcanzar

de una sola forma: diseño robusto y fabricación con altísimo control de calidad para eliminar los dispositivos defectuosos.

Las heteroestructuras tienen un importante impacto en la ciencia y tecnología moderna y son el fundamento de los transistores de alta frecuencia y de los dispositivos optoelectrónicos.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] Y. Cho, "Film Deposition by Molecular Beam Techniques". *J. Vacuum Science and Technol.*, Vol. 8, No. 5, Sept.-Oct. 1971, pp. S31-S38.
- [2] L. L. Chang and L. Esaki, "Semiconductor quantum heterostructures". *Physics Today*, 45, pp.36-43, Oct. 1992.
- [3] H. Aya, "Modelamiento de dispositivos de tunelamiento resonante". XVIII Congreso Nacional de Física. Sociedad Colombiana de Física. Junio 28 - Julio 2 de 1999. Santafé de Bogotá.
- [4] W. Shockley, "The Theory of p-n Junctions in Semiconductors and p-n Junction Transistors". *Bell System Technical Journal*. Vol. 28, No. 4, July 1949. pp. 435-489.
- [5] W. Shockley G. L. Pearson, and J. R. Haynes, "Hole Injection in Germanium-Quantitative Studies and Filamentary Transistors". *Bell System Technical Journal* Vol. 28, No. 4, July 1949, pp. 344-366.
- [6] W. Shockley, M. Sparks, and G. K. Teal, "p-n Junction Transistors". *Physical Review*, Vol. 83, No. 1, July 1, 1951, pp. 151-162.
- [7] W. Shockley, *Electrons and Holes in Semiconductors*. Van Nostrand, Princeton, New Jersey, 1950
- [8] W. R. Frensley, "Gallium Arsenide transistors". *Scientific American*, 257, pp. 80-87, Aug. 1987.
- [9] Dambkes, H., "Gallium Arsenide HEMTs for Low-Noise GHz communication engineering". *Microelectronics journal*, 20, pp. 1-6, Sep.-Oct. 1989.
- [10] Morkoc, H., "The HEMT: A superfast transistor". *IEEE Spectrum*, 21, pp. 28-35, Feb. 1984.
- [11] Drummund, T. J., et al., "Modulation-Doped GaAs/(Al,Ga)As Heterojunction Field-Effect Transistors: MODFETs". *Proceedings of the IEEE*, 74, pp. 773-822, Jun. 1986.
- [12] R. Dingle and C. H. Henry, "Quantum Effects in Heterostructure Lasers". U.S. Patent 3,982,207. filed Mar. 7, 1975. issued Sept. 21, 1976.
- [13] R. Dingle W. Weigmann. and C. H. Henry, "Quantum States of Confined Carriers in Very Thin  $A_{x-1}Ga_xAs$ -GaAs-Al $_x$ Ga $_{1-x}$ As Heterostructures". *Phys. Rev. Lett.*, Vol. 33, No. 14, Sept. 1974, pp. 827-830.
- [14] L. Schawlow and C. H. Townes, "Infrared and Optical Masers". *Phys. Rev.* Vol. 112. 1958, p. 194.
- [15] T. H. Maiman, "Stimulated Optical Radiation in Ruby". *Nature*, Vol. 6, 1960, p. 106.
- [16] M. I. Nathan, W. P. Dumke, G. Burns, F. H. Dill, Jr., and G. Lasher, "Stimulated Emission of Radiations from GaAs p-n Junctions". *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 1, No. 3, Nov 1962, pp. 62-64.
- [17] R. N. Hall, G. E. Fenner, J. D. Kingsley, T. J. Soltys, and R. O. Carlson, "Coherent Light Emission from GaAs Junctions". *Phys. Rev. Lett.* Vol. 9, No. 9, Nov. 1962, pp. 366-368.
- [18] N. Holonyak, Jr., and S. F. Bevacqua. "Coherent (Visible) Light Emission from GaAsP Junction". *Appl. Phys. Lett*, Vol. 1, No. 4, Dec. 1962, pp. 82-83.
- [19] T. M. Quist, H. Rediker, R. J. Keyes, W. E. Krag, B. Lax, A. L. McWhorter, and H. J. Zeigler, "Semiconductor Maser of GaAs". *Appl. Phys. Lett*. Vol. 1, No. 4, Dec. 1962, pp. 91-92.
- [20] H. Kroemer, "A Proposed Class of Heterojunction Injection Lasers". *Proc. IEEE*, Vol. 51, No. 12, Dec. 1963, pp. 1782-1783.
- [21] Zh. I. Alferov and R. F. Kazarinov, "Semiconductor Laser with Electrical Pumping". U.S.S.R. Patent., author's certificate 181.737, claim 950, 840, Mar. 30, 1963.
- [22] Zh. I. Alferov, y M. Andreev, D. Z. Garbuzov, Yu. V. Zhilyaev, E. P. Morozov, E. L. Portnoi, and V. G. Trofim, "Investigación de la Influencia de los parámetros de la heteroestructura de AlAs-GaAs en la corriente umbral del laser y la realización de emisión continua a temperatura ambiente ". *Fiz. Tekh. Poluprovodn.*, Vol. 4. No. 9, Sept. 1970, pp. 1826-1829. (en Ruso)
- [23] L. Hayashi, M. B. Panish, P. W. Foy, and S. Sumski., "Junction Lasers Which Operate Continuously at Room Temperature". *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 17, No. 3, Aug. 1970, pp. 109-111.
- [24] J. J. Hsieh, J. A. Rossi, and J. P. Donnelly, "Room-Temperature CW Operation of GaInAsP/InP Double-Heterostructure Diode Lasers Emitting at 1.1  $\mu$ m". *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 28, No. 12, June 1976, pp. 709-711.
- [25] M. A. Poliack, R. U. Nahory, J. C. De Winter, and A. A. Ballman, "Liquid Phase Epitaxial In $_x$ Ga $_{1-x}$ As $_y$ P $_{1-y}$  Lattice Matched to (100) InP over the Complete Wavelength Range 0.92  $\mu$ m <  $\lambda$  < 1.65  $\mu$ m". *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 33, No. 4, Aug. 1978, pp. 314-316
- [26] E. Rosencher et B. Vinter, *Optoélectronique*. Masson. Paris. 1998.

### Hugo L. Aya Baquero

Físico. U. Kishinev. Rusia, Magister en Ingeniería Eléctrica. U. de los Andes.  
Grupo de Optoelectrónica. U. Distrital.  
Profesor de la Facultad de Ingeniería. Universidad Distrital  
Laoez@udistrital.edu.co